



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

**Maarja Salu**

**ÕPPEAINE „SOOJUSTEHNICA“ LABORATOORNE TÖÖ  
KÜTTEPUIDU OMADUSTE MÄÄRAMISEST**

**THERMAL ENGINEERING LABORATORY WORK ON  
EVALUATION OF WOOD-FUEL PROPERTIES**

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendaja: lektor Mart Hovi, *MSc*  
lektor Külli Hovi, *MSc*

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Maarja Salu		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia	
Pealkiri: Õppeaine “Soojustehnika” laboratoorne töö küttepuidu omaduste määramisest			
Lehekülgi: 30	Jooniseid: 6	Tabeleid: 5	Lisasid: 2
<p>Osakond / Õppetool: Energiakasutuse õppetool</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Loodusteadused ja tehnika</p> <p>4.17. Energeetikaalased uuringud</p> <p>T140 Energeetika</p> <p>Juhendajad: lektorid Mart Hovi, <i>MSc</i> ja Külli Hovi, <i>MSc</i></p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Eesti Maaülikool, 2021</p>			
<p>Bakalaureusetöö peamiseks eesmärgiks on koostada Soojustehnika õppeaine tarbeks laboratoorne töö küttepuidu omaduste määramisest. Antud laboratoorne töö vastab õppeaine õpiväljunditele.</p>			
<p>Töös analüüsitakse puidu niiskust ja sellega kaasnevaid arvutustulemusi. Töövahenditest kasutati elektroonilisi niiskusemõõtlajaid, elektroonilisi kaale, kuivatuskappi, kalkulaatorit, mõõdulinti.</p>			
<p>Antud bakalaureusetööl on kaks osa – teoreetiline ja praktiline. Teoreetilises osas on toodud välja Soojustehnika õppeaine õpiväljundid, puidu omadused kütusena ja erinevad kuivatusviisid. Praktiline osa põhineb laboratoorse töö katse läbi tegemisel.</p>			
<p>Edasiste uuringute osas oleks soovitatav tegeleda proovitükkide tiheduse ja kütteväärtuse arvutamisega.</p>			
Märksõnad: soojustehnika, labor, õppematerjal, niiskus, mõõtmine.			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Bachelor's Thesis	
Author: Maarja Salu		Curriculum: Engineering	
Title: Thermal Engineering Laboratory Work on Evaluation of Wood-Fuel Properties			
Pages: 30	Figures: 6	Tables: 5	Appendixes: 2
Department / Chair: Chair of Energy Application Engineering Field of research and (CERC S) code: Natural Sciences and Engineering 4.17. Energetic Research TI140 Energy research Supervisors: lecturer Mart Hovi, <i>MSc</i> ja lecturer Külli Hovi, <i>MSc</i> Place and date: Estonian University of Life Sciences, 2021			
<p>The main objective of the bachelor's work is to formalize laboratory work on determining the properties of heating wood for the use of the thermal technology study subject. This laboratory work corresponds to the subject's learning outcomes.</p> <p>The work analyses the humidity content of the wood and the related calculation results. The tools used were electronic moisture meters, electronic scales, oven, calculator, measuring tape.</p> <p>This bachelor's thesis has two parts – theoretical and practical. In the theoretical part, the study outputs of the thermal engineering study subject, the characteristics of wood as fuel and different drying methods are outlined. The practical part is based on laboratory work test through making.</p> <p>For further studies, it would be advisable to deal with the calculation of the density of samples and the heating value.</p>			
Keywords: thermal engineering, laboratory, study material, humidity, measuring.			

# SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID .....	5
SISSEJUHATUS .....	7
1. SOOJUSTEHNICA ÕPPEAINE .....	8
1.1. Üldandmed ja õpiväljundid .....	8
1.2. Laboratoorne töö .....	8
1.3. Ohutushoid .....	8
2. KÜTUSED JA KUIVATAMINE .....	9
2.1. Puit kütusena .....	9
2.2. Küttepuidu omadused .....	11
2.2.1. Niiskus .....	11
2.2.2. Kütteväärtus .....	12
2.2.5. Mahumass ja tihedus .....	12
2.3. Kuivatamise viisid .....	13
3. MÕÕTMISMETOODIKA JA TÖÖVAHENDID .....	14
3.1. Mõõtmismetoodika .....	14
3.2. Proovitükkide kaalumise .....	15
3.3. Proovitüki niiskuse määramine .....	15
3.3.1. Elektroonilise niiskusemõõtjaga .....	15
3.3.1. Arvutusmeetodil .....	16
3.3. Proovitüki kuivmassi määramine .....	17
3.3.1. Proovitüki massi määramine muu lõppniiskuse korral .....	17
4. KATSE TULEMUSED .....	18
4.1. Mõõtmis- ja arvutustulemused .....	18
KOKKUVÕTE .....	23
KASUTATUD KIRJANDUS .....	24
SUMMARY .....	26
LISAD .....	27
Lisa 1. Laboratoorse töö juhend .....	28
Lisa 2. Lihtlitsents .....	30

## TÄHISED JA LÜHENDID

$A^t$	– tuha sisaldus tarbimisaines, %
$C^t$	– süsiniku sisaldus tarbimisaines, %
$g$	– gramm
$h$	– kõrgus, m
$H^t$	– vesiniku sisaldus tarbimisaines, %
$kg$	– kilogramm
$m^3$	– kuupmeeter
$m_1$	– mass enne kuivatamist, kg
$m_2$	– mass pärast kuivatamist, kg
$m_k$	– kuivmass, kg
$m_v$	– vee mass, kg
$O^t$	– hapniku sisaldus tarbimisaines, %
$pm^3$	– puitsekuupmeeter
$p^t$	– põlevosa, %
$Q_a^t$	– kütteväärtus, J/kg
$r$	– raadius, m
$rm$	– ruumimeeter
$t^{\circ}$	– kastepunkt, $^{\circ}C$
$tm$	– tihumeeter
$V$	– ruumala, $m^3$
$w$	– niiskus, %

- $W^t$  – niiskus tarbimisaines, %
- $\varepsilon$  – epsilon
- $\pi$  – pii ehk Archimedese konstant

## SISSEJUHATUS

Antud töö annab ülevaate küttepuidu omaduste, eelkõige niiskuse, määramisest. Töös käsitletakse kütuse niiskuse mõõtmist ja sellega seonduvaid metoodilisi arvutusi. Arvutustulemuste põhjal on koostatud ka vastav analüüs. Küttepuidu omadusi nagu tihedus, kütteväärtus, mahumass ja ruumala käsitletakse töös pealiskaudsemalt, sest niiskus on oluline tegur, mis neid kõiki mõjutab.

Lõpptulemusena valmis uus ja innovaatiline Soojustehnika õppeaine samanimeline laboratoorse töö juhend (ε) „Küttepuidu omaduste määramine“, mis on ka antud töö põhieesmärgiks. Valminud laboratoorne töö vastab töös välja toodud õppeaine õpiväljunditele. Laboratoorse töö lahendamine annab üliõpilasele ülevaate erialastest mõistetest ja uurimismeetoditest.

Tööl on kaks osa – teoreetiline ja praktiline osa. Teoreetilises osas on toodud välja Soojustehnika õppeaine õpiväljundid, puidu omadused kütusena ja erinevad kuivatusviisid.

Praktiline osa põhineb laboratoorse töö katse läbi tegemisel. Töövahenditest kasutati elektroonilisi niiskusemõõtjaid, elektroonilisi kaale, kuivatuskappi, kalkulaatorit ja mõõdulinti.

Eesmärgi saavutamiseks püstitatud ülesanded: 1) proovitükkide parameetrite mõõtmine, 2) teostada proovitükkide kuivatamine, 3) vajalike arvutuste tegemine ja 4) laboratoorse töö juhendi vormistamine.

# **1. SOOJUSTEHNICA ÕPPEAINE**

## **1.1. Üldandmed ja õpiväljundid**

Õppeaine Soojustehnika, ainekoodiga TE.1013, kuulub Tehnika ja Tehnoloogia ning Tehnotroonika õppekavade alla. Tegemist on õppeainega, mille lõpphindamine on eristav ja kogumaht 5 EAP-d. [1]

Õpiväljundid, mille õppeaine sooritanud üliõpilane omandab:

- 1) termodünaamilise keha oleku ja selle muutustega kaasneva energia muundumise tundmine;
- 2) soojuslevi arvutuse meetodite ja soojusvahetite soojustehnilise modelleerimise valdamine;
- 3) soojusseadmete projekteerimise oskus;
- 4) soojusseadmestiku käitlejana töötamise pädevuse omandamine. [1]

## **1.2. Laboratoorne töö**

Soojustehnika õppeaine üheks hindamisele pääsemise tingimuseks on positiivselt sooritatud laboratoorsed tööd.

Nagu ka eelnevalt välja toodud, siis on antud bakalaureusetöö eesmärgiks koostada õppeaine tarbeks laboratoorne töö kütuse omaduste mõõtmistest. Antud laboratoorse töö käigus tutvuvad üliõpilased materjalide kuivatusprotsessidega. Käsitletakse kütuse, praegusel juhul puidu, niiskuse mõõtmist ja hilisemat analüüsi.

## **1.3. Ohutushoid**

Laboratoorse töö alustamiseks tuleb üliõpilastel tutvuda eeskirjaga nr E1-2019, mis sätestab ohutushoiu nõuded töötamiseks Energiakasutuse õppetooli laborites Tehnikainstituudis Eesti Maaülikoolis. Üliõpilased peavad olema eelnevalt instrueeritud ohutustehnikas ja selle fikseerinud ohutustehnika instrueerimisžurnaalis oma allkirjaga. [2]



## 2. KÜTUSED JA KUIVATAMINE

### 2.1. Puit kütusena

Selleks, et mingisugust ühendit saaks liigitada kütuseks, peab see vastama mitmesugustele kriteeriumitele. Antud juhul peab toorainet olema looduses küllaldaselt või siis on kütust lihtne juurde toota. [3]

Puitkütuseid saab liigitada vastavalt sellele, kust on pärit nende tooraine (Tabel 1). Näiteks on metsast ja energiametsast pärit kütused võrreldes korduvkasutusega puitkütustega loodussõbralikud. Korduvkasutusega puitkütused sisaldavad tihti erinevaid kemikaale. Seda seetõttu, et neid värvitakse ja immutatakse erinevate lisaainetega. [4]

**Tabel 1.** Puitkütused tooraine päritolu järgi [4]

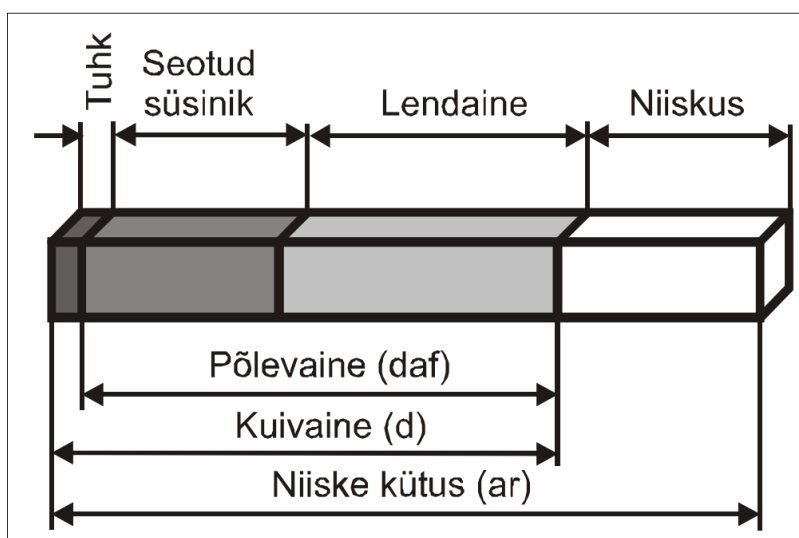
Puitkütused		
Metsast saadavad kütused	Energiametsast saadavad kütused	Korduvkasutusega kütused
1) Traditsiooniline küttepuit 2) Raiejäätmed 3) Kännud 4) Puidutöötlemise jäätmed	1) Kiiresti kasvavad puuliigid	1) Lammutuspuit 2) Ehituspuit 3) Pakkepuit

Puidu kütusena käsitlemiseks mõjutavad tema omadusi mitmed tunnused. Nendeks tunnusteks on: 1) keemiline koostis (Tabel 2), 2) kütteväärtus, 3) niiskus, 4) tihedus, 5) lendosade sisaldus, 6) kõvadus, 7) süsiniku sisaldus, 8) tuhasus ja tuha koostis, 9) tuha sulamise karakteristikad ja 10) lisandite olemasolu. [5]

**Tabel 2.** Puidu elementaarkoostis [4]

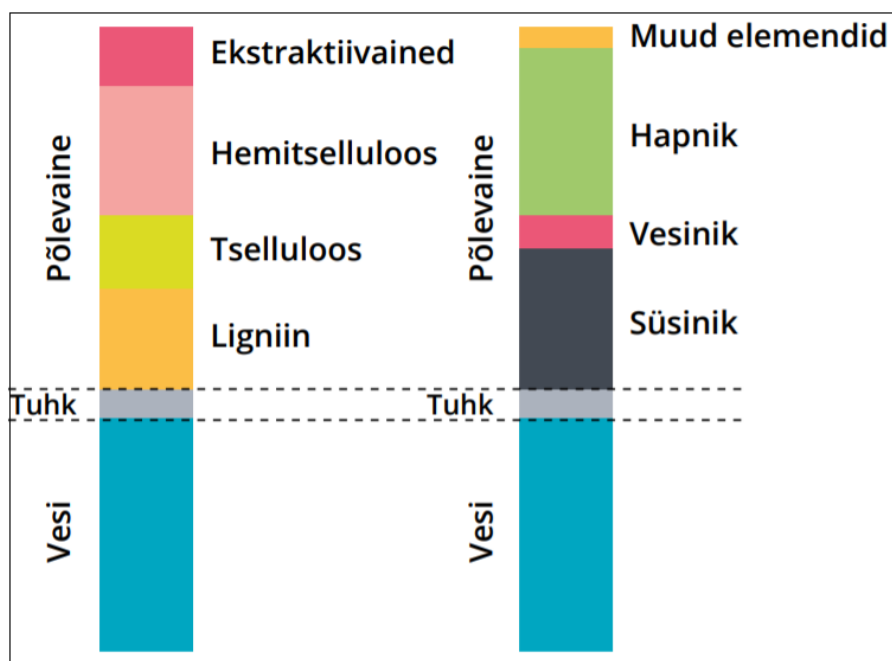
Element, % kuivaines	Puit	Koor
C (süsinik)	48 – 50	51 – 66
H (vesinik)	6,0 – 6,5	5,9 – 8,4
O (hapnik)	38 – 42	24,3 – 40,2
N (lämmastik)	0,5 – 2,3	0,3 – 0,8
S (väävel)	0,05	0,05
Cl (kloor)	< 0,01	0,01 – 0,03

Kuna puitkütused on tahked kütused, siis koosnevad need põlevosast ja ballastist (tuhk ja niiskus). Joonis 1 annab ülevaate tahke kütuse komponentidest. [4]



**Joonis 1.** Puitkütuse komponendid. [4]

Tahke kütuse koostisosadeks on: 1) põlevosa, 2) mineraalosa ja 3) niiskus. Põlevosa koosneb lisaks aga orgaanilisest ainest, mida illustreerib joonis 2. Joonisel on välja toodud ka teised olulised elemendid puitkütuse koostises, milleks on süsinik, vesinik ja hapnik. Vähesel määral sisaldab puit ka lämmastikku ja orgaanilist väävlit. Väävel on üldiselt kütuses väga kahjulik komponent, sest see kahjustab näiteks põletusseadmeid ja samuti annab põlemisel vähe soojust. [13]



**Joonis 2.** Puitkütuse koostisosad ja elementkoostis. [13]

## 2.2. Küttepuidu omadused

Küttepuidus sisalduv niiskus mõjutab oluliselt nii puidu tihedust, kütteväärtust, mahumassi kui ka ruumala. Niiskuse tõttu väheneb kütuse kütteväärtus, suureneb põlemisgaaside maht ja tõuseb kastepunkti temperatuur. [13]

### 2.2.1. Niiskus

Puidu niiskuseks nimetatakse puidus sisalduva vee massi ja puidu massi suhet protsentides.

Tahked materjalid, nagu näiteks puit, võivad sisaldada nii vett, veeauru, kui ka jääkristalle. Kütuse niiskus jaguneb järgmiselt: a) väline ehk mehaaniline ja b) sisemine ehk kolloidne niiskus. Lisaks niiskusele sisaldub kütuses ka vett kristallvee ehk hüdraatvee näol. Antud vesi eemaldub kütuse kuumutamisel üle 500 °C. [3, 6]

Väline niiskus on pind- ja kapillaarne niiskus, mis paikneb kütuse pinnal, poorides ja kapillaarides. Antud niiskuse tüüp satub kütusesse põhja- ja pinnaveest ning samuti atmosfäärist. Seda siis kütuse tootmisel, transpordil ja hoidmisel. Pindniiskus eraldub õhu käes kuivatamisel temperatuuril 20...30 °C. [3]

Sisemise niiskuse hulk kütuses sõltub kütuse vanusest ja koostisest. Mida vanem on kütus, seda vähem on selles niiskust. Selleks, et kütusest eraldada täielikult sisemine niiskus, tuleb kütust kuivatada temperatuuril üle 100 °C. [3]

Kui kütuses, näiteks puidus, on liiga palju niiskust, siis vähendab see kütuse kütteväärtust. Sellest tulenevalt suureneb ka kütuse kulu kütmisel. Liigne kütuses sisalduv niiskus soodustab kütuse isesüttimist ja ka külmumist. [3]

### **2.2.2. Kütteväärtus**

Ühe massiühiku (näiteks kilogramm) kütuse (näiteks puidu) täielikul põlemisel eralduvat soojushulka nimetatakse kütteväärtuseks. Omavahel eristatakse alumist ja ülemist kütteväärtust. Põlemisgaasis oleva veeauru kondenseerumissoojus ehk kastepunkt sisaldub ülemises kütteväärtuses. Praktikas rakendatakse alumist kütteväärtust, kui põlemisgaasi temperatuur on kõrgem kastepunktist. [13, 16]

Küttepuidu niiskus vähendab oluliselt kütteväärtust. Mida niiskem on kütus, seda raskem on seda süüdata. Selleks, et küttepuudega kütmine oleks tulemuslik, tuleks kasutada kuivi küttepuid. Vastasel juhul läheb suur hulk soojusest kasutult korstnasse. [4]

### **2.2.5. Mahumass ja tihedus**

Looduslikus olekus materjali mahuühiku massi nimetatakse mahumassiks. Tavaliselt on looduslikel ainetel antud mahumass mingisuguses vahemikus. [7]

Mahumasside erinevused võivad tulenevad kütuse massist, tihedusest ja niiskusest. [4]

Näiteks tuleks hakkpuidu mahtu määrata enne selle mahalaadimist kütuseveoki mahu ja täituvuse järgi. Seda seetõttu, et transpordi ajal võib veokis oleva koorma tihedus suurened. Ehk mahumass on pärast kütuse veoki kasti laadimist väiksem kui katlamajja saabumisel. [4]

Küttepuidu tihedus sõltub puiduliigi massist ja tegelikust mahust. Tiheduse mõõtühikuna kasutatakse näiteks  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{kg/tm}$ ,  $\text{kg/pm}^3$  ja  $\text{kg/rm}$ . [13]

### **2.3. Kuivatamise viisid**

Materjali niiskuse vähendamiseks seda kuivatatakse. Tänapäeval tuntakse kolme liiki kuivatamist: a) mehaanilist, b) füüsikalis-keemilist ja c) soojuslikku. [6]

Mehaanilise kuivatamise käigus eemaldatakse väga niiskest või täiesti märjast materjalist vesi muljumise või tsentrifuugimisega. [6]

Füüsikalis-keemilise kuivatamise käigus toimub kuivatamine absorbentide, nt keedusool, või keemiliste ainete (nt väävelhape) abil, mis seovad vett. [6]

Soojusliku kuivatamise käigus eraldub materjalist liigvesi aurustumise teel. [6]

### 3. MÕÕTMISMETOODIKA JA TÖÖVAHENDID

#### 3.1. Mõõtmismetoodika

Töö käigus kasutati välitingimustes seisnud musta lepa halupuid (Joonis 1). Halupuud lõigati kaheteistkümneks erineva suurusega proovitükiks, mille parameetreid hakati uurima.



**Joonis 3.** Välitingimustes seisnud musta lepa halupuud.

Proovitükid lõigati poolsilindri kujulisteks, mille ühe tüki keskmine ruumala oli  $236 \text{ cm}^3$ . Ruumala määramiseks kasutati silindri ruumala valemit [12]:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h, \quad (1)$$

kus  $V$  on ruumala,  $\text{cm}^3$ ;

$\pi$  - pii ehk Archimedese konstant;

$r$  - silindri raadius,  $\text{cm}$ ;

$h$  - silindri kõrgus,  $\text{cm}$ ;

Proovitükkide mõõtmised määrati mõõdulindiga. Igale proovitükile omistati tähis, antud juhul number ühest kuni kaheteistkümneni (Joonis 2).



**Joonis 4.** Tähistatud proovitükid enne kuivatuskappi asetamist.

### **3.2. Proovitükkide kaalumine**

Proovitükkide kaalumiseks kasutati kolme erinevat kaalu, mis on Eesti Maaülikooli katlalaboris kasutusel:

- 1) KERN 440-33N, mille mõõtmisvahemik on 0,01...200 g;
- 2) KERN 440-47N, mille mõõtmisvahemik on 0,1...2000 g;
- 3) Radwag WLC 6/A2/C/2, mille mõõtmisvahemik on 0,1...6000 g. [8, 9]

Kõik proovitükid kaaluti eraldi ja iga proovitüki kaal kirjutati üles.

### **3.3. Proovitüki niiskuse määramine**

Proovitükkide niiskused mõõdeti nii elektroonilise niiskusemõõtljaga kui ka arvutusmeetodil.

#### **3.3.1. Elektroonilise niiskusemõõtljaga**

Märgade katsekehade mõõtmiseks kasutati kolme erinevat elektroonilist niiskusemõõtljat (Joonis 3):

- 1) Wetekom, mille mõõtmisvahemik on 0...60 %;
- 2) Testo 606-2, mille mõõtmisvahemik on 0...54,8 %;
- 3) Gann Hydromette Compact S, mille mõõtmisvahemik on 10...50 %. [10, 11]



**Joonis 5.** Elektroonilised niiskusemõõdjad.

### 3.3.1. Arvutusmeetodil

Niiskuse määramiseks arvutusmeetodi teel asetati proovitükid pärast kaalumist ja elektrooniliste niiskusemõõdjatega niiskuse määramist kuivatuskappi. Kuivatuskapis olev temperatuur oli süttimise vältimiseks  $105 \pm 2$  °C. [4]

Proovitükid asetati kuivatuskappi 9. veebruaril kell 14.30 ja võeti kuivatuskapist välja 11. veebruaril kell 8.40.

Niiskuse sisaldust puidus saab arvutusmeetodil määrata masside järgi [4]:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

kus  $w$  on niiskus, %;

$m_1$  - mass enne kuivatamist, kg;

$m_2$  - mass pärast kuivatamist, kg.

Tulenevalt proovitükkide niiskusest on proovitüki algne mass suurem, kui pärast kuivatuskapis oldud perioodi.



### 3.3. Proovitüki kuivmassi määramine

Kuivmassi määramiseks tuleb leida vee mass proovitükis:

$$m_v = \frac{m_1 \cdot w}{100\%}, \quad (3)$$

kus  $m_v$  on vee mass, kg;

$m_1$  - mass enne kuivatamist, kg;

$w$  - niiskus, %.

Pärast vee massi leidmist proovitükis on võimalik leida puidu kuivmass:

$$m_k = m_1 - m_v, \quad (4)$$

kus  $m_k$  on kuivmass, kg;

$m_1$  - mass enne kuivatamist, kg;

$m_v$  - vee mass, kg.

#### 3.3.1. Proovitüki massi määramine muu lõppniiskuse korral

Selleks, et leida proovitüki mass mõne muu lõppniiskuse korral, tuleb kasutada puidu kuivmassi:

$$m_{x\%} = \frac{m_k \cdot 100\%}{(100-x)\%}, \quad (5)$$

kus  $m_{x\%}$  on mass  $x$  lõppniiskuse korral, kg;

$m_k$  - kuivmass, kg;

$x$  - lõppniiskus, %.

## 4. KATSE TULEMUSED

### 4.1. Mõõtmis- ja arvutustulemused

Tabel 3 annab ülevaate katse käigus tehtud mõõtmistest. Antud tabelis on välja toodud proovitükkide massid enne kuivatuskappi asetamist ja pärast kuivatuskapist välja võtmist. Pärast proovitükkide kuivatuskapist välja võtmist sai täheldada, et kuivamise tulemusena on hakanud katsekehadelt koor lahti tulema. Seda seetõttu, et proovitükk mingil määral kahanes ja koore õhulisuse tõttu lõi see tüki küljest lahti.

Pärast kuivatuskapist välja võtmist sai fikseeritud ka proovitükkide kogumass koos kastiga, milleks oli 1468,8 g (Joonis 4). Kasti mass oli 88,4 g. Ainult proovitükkide kogumass oli 1380,4 g.



**Joonis 6.** Proovitükkide kogumass koos kastiga.

Samuti on tabelis 3 välja toodud elektrooniliste niiskusemõõjtjatega mõõdetud niiskused proovitükkides.

**Tabel 3.** Mõõtmistulemused enne ja pärast kuivatamist

Proovitüki nr	KERN 440-33N		KERN 440-47N		Radwag WLC 6/A2/C/2		Wetekom	Testo 606-2	Compact S
	Mass enne kuivatamist, g	Mass pärast kuivatamist, g	Mass enne kuivatamist, g	Mass pärast kuivatamist, g	Mass enne kuivatamist, g	Mass pärast kuivatamist, g	Niiskus, %		
1	151,71	116,35	151,7	116,5	151,8	116,4	16	16,3	15,5
2	-	147,48	215,5	147,6	215,6	147,6	16	16,6	16,3
3	179,38	136,72	179,5	136,8	179,5	136,8	16	16,6	17,0
4	201,41	138,82	201,5	138,9	201,5	138,9	16	17,8	16,7
5	166,74	105,00	166,9	105,0	166,9	105,1	17	19,2	19,2
6	150,90	116,85	151,0	117,0	151,0	117,0	15	15,8	16,5
7	112,34	85,87	112,4	85,9	112,4	86,0	16	20,2	17,6
8	152,19	115,27	152,1	115,4	152,2	115,4	17	18,5	16,6
9	173,74	107,62	173,8	107,7	173,9	107,7	17	17,9	16,4
10	128,98	96,8	129,0	96,9	129,0	96,9	16	20,3	18,0
11	128,55	86,24	128,6	86,3	128,6	86,3	17	21,6	17,0
12	184,03	125,24	184,1	125,4	184,1	125,4	16	18,0	17,0

Tabel 4 annab ülevaate mõõtmistulemuste alusel tehtud arvutustest. Arvutustulemused on saadud eespool esitatud valemite abil. Niiskused on arvutatud välja kasutades iga proovitüki keskmist alg- ja lõppmassi.

**Tabel 4.** Niiskuse arvutustulemused

Proovitüki nr	Mass $m_1$ , g	Mass $m_2$ , g	Niiskus w, %
1	151,74	116,42	23,28
2	215,55	147,56	31,54
3	179,46	136,77	23,79
4	201,47	138,87	31,07
5	166,85	105,03	37,05
6	150,97	116,95	22,53
7	112,38	85,92	23,55
8	152,16	115,36	24,19
9	173,81	107,67	38,05
10	128,99	96,87	24,90
11	128,58	86,28	32,90
12	184,08	125,35	31,90

Proovitükkide arvutatud niiskused jäid vahemikku 22,53...38,05 %. Niiskuse suur erinevus tuleneb ilmselt sellest, et puuhalud seisid väljas ebakorrapäraselt. Mõni halg sai rohkem ja mõni vähem välist niiskust.

Proovitükkide keskmine niiskus aritmeetilisel teel leides oli 28,73 %.

Tabelis 5 on välja toodud proovitükkides esineva vee mass ja katsekehade kuivmassid.

**Tabel 5.** Vee mass ja kuivmass

Proovitüki nr	Vee mass $m_v$ , g	Kuivmass $m_k$ , g
1	35,33	116,41
2	67,98	147,57
3	42,69	136,77
4	62,60	138,87
5	61,82	105,03
6	34,01	116,96
7	26,47	85,91
8	36,81	115,35
9	66,13	107,68
10	32,12	96,87
11	42,30	86,28
12	58,72	125,36

Nagu ka eelnevalt on töös välja toodud, siis küttepuidus sisalduv niiskus mõjutab oluliselt nii puidu erinevaid omadusi. Mida suurem on kütuses olev niiskus, seda väiksem on kütteväärtus.

Õhus sisalduva veeauru hulka, mille juures toimub veeauru küllastumine, näitab kastepunkt. Kastepunkti tähistatakse  $t^\circ$ , mis on temperatuur. [14]

Teades põlevaine elementaarkoostist, mis on eelpool tabelis 2 välja toodud (kasutades keskmisi väärtusi), saame arvutada välja võimaliku alumise kütteväärtuse, mis sõltub suurel määral niiskusest. Väävl ja lämmastiku sisaldus puidus on väga minimaalne ja seega arvutuses ei kasutata.

Põlevaine elementaarkoostise kasutatud väärtused: a) C – 49 %, b) H – 6,3 % ja c) O – 40 %. Sellest tulenevalt kasutame tuha sisaldusena  $A^t$  väärtust 4,7 % ja proovitükkide keskmist niiskust  $W^t$ , mis oli 28,73 %.

Enne kütteväärtuse arvutamist tuleb leida põlevosa ja sellest tulenevalt ka kütuse tarbimisaine koostis.

$$p^t = \frac{100 - A^t - W^t}{100}, \quad (5)$$

kus  $p^t$  on põlevosa, %;

$A^t$  - tuha sisaldus, %;

$W^t$  - niiskuse sisaldus tarbimisaines, % [15].

Arvutuse tulemusena selgub, et põlevosa tarbimisaines  $p^t$  on 0,67 %.

Tarbimisaine koostise arvutamiseks tuleb põlevaine elementaarkoostise elemendid korrutada põlevosaga tarbimisaines. Näidisenä on süsiniku sisaldus tarbimisaine koostises.

$$C^t = C \cdot p^t, \quad (6)$$

kus  $C^t$  on süsiniku sisaldus tarbimisaines, %;

$C$  - süsiniku sisaldus põlevaines, %;

$p^t$  - põlevosa, % [15].

Kütuse tarbimisaine koostis on järgmine: a)  $C^t - 32,83$  %, b)  $H^t - 4,22$  % ja c)  $O^t - 26,80$  %

$$Q_a^t = 340 \cdot C^t + 1260 \cdot H^t - 109 \cdot O^t - 25 \cdot W^t, \quad (7)$$

kus  $Q_a^t$  on kütteväärtus, J/kg;

$C^t$  - süsiniku sisaldus tarbimisaines, %;

$H^t$  - vesiniku sisaldus tarbimisaines, %;

$O^t$  - hapniku sisaldus tarbimisaines, %;

$W^t$  - niiskuse sisaldus tarbimisaines, %. [15]

$$Q_a^t = 340 \cdot 32,83 + 1260 \cdot 4,22 - 109 \cdot 26,80 - 25 \cdot 28,73 = 12839,95 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Võimalik alumine kütteväärtus katses kasutatud halupuudel on arvutustulemusena 12 839,95

$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$  ehk  $12,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ .

## KOKKUVÕTE

Töös uuriti välitingimustes seisnud halupuude (must lepp) niiskust. Niiskuse mõõtmiseks tehti halupuudest sarnase suurusega proovitükid. Proovitükkide parameetrid mõõdeti ja pandi kirja arvutustulemuste tarbeks ning seejärel asetati katsekehad kuivatuskappi, kus oli temperatuur püsivalt  $105 \pm 2$  °C.

Katse tulemusi analüüsides on näha, et proovitükkide niiskused jäid vahemikku 22,53...38,05 %. See on üsna suur vahemik sellise koguse proovitükkide peale.

Peamine probleem, mis töö käigus selgus, oli proovitükkide mõõtmine. Mõõtmist oleks pidanud teostama näiteks uputusmeetodil. Nii oleks olnud võimalik määrata ka proovitükkide tihedust.

Töö tulemusena valmis Eesti Maaülikooli Tehnika ja tehnoloogia õppekava Soojustehnika õppeaine laboratoorne töö, mille käigus saavad üliõpilased tutvuda kütuse, antud juhul puidu, niiskuse mõõtmisega.

Antud bakalaureusetööga valminud õppematerjal annab üliõpilasele ülevaate erialastest mõistetest ja uurimismeetoditest. Samuti saab üliõpilane kogemuse, kuidas koguda, analüüsida ja tõlgendada enda jaoks vajalikke andmeid.

Edasiste uuringute mõistes oleks soovitatav tegeleda täpsemalt veel ka tiheduse ja kütteväärtuse arvutamisega.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. Eesti Maaülikooli Õppeinfosüsteem. Õppeained. Soojustehnika. Koduleht [WWW] [https://ois.emu.ee/rwervlet?oa\\_aine\\_info.rdf+1208653+HTML+51068949800791269565+text/html](https://ois.emu.ee/rwervlet?oa_aine_info.rdf+1208653+HTML+51068949800791269565+text/html) (02.05.2021)
2. Ohutushoiu eeskirjad töötamiseks EMÜ Tehnikainstituudi Energiakasutuse õppetooli laborites. Eeskiri nr. E1-2019.
3. **Veski, A.** (1991). Katelseadmed. Tallinn: Valgus. 192 lk.
4. **Vares, V., Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S.** (2005). Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ kirjastus. 172 lk.
5. **Kask, Ü., Muiste, P., Vares, V.** (2010). Puitkütus. Tallinn: Ecoprint AS. 20 lk.
6. **Hovi, M., Treier, V.** (1997). Kuivatusõpetus. Tartu. 64 lk.
7. Viimistlusmaterjalide põhiomadused. Koduleht [WWW] [https://e-ope.khk.ee/ek/2012/moobli\\_ja\\_puittoodete\\_viimistlemine/materjalide\\_omadused/viimistusmaterjalide\\_phiomadused.html](https://e-ope.khk.ee/ek/2012/moobli_ja_puittoodete_viimistlemine/materjalide_omadused/viimistusmaterjalide_phiomadused.html) (02.05.2021)
8. KERN products [WWW] [https://www.kern-sohn.com/cgi-bin/cosmoshop/lshop.cgi?action=suche&ls=en&gesamt\\_zeilen=0&suchbegriff=440-47N](https://www.kern-sohn.com/cgi-bin/cosmoshop/lshop.cgi?action=suche&ls=en&gesamt_zeilen=0&suchbegriff=440-47N) (08.05.2021)
9. Radwag products [WWW] <https://radwag.com/en/wlc-6-a2-c-2-precision-balance,w1,WP7,101-102-108#1> (08.05.2021)
10. Testo 606 data sheet [WWW] <https://static-int.testo.com/media/69/09/0145d54bf4aa/testo-606-Data-sheet.pdf> (08.05.2021)
11. Gann products [WWW] <https://www.gann.de/en/products/handhelds/electronic-moisture-meters/compact-series/compact-s> (08.05.2021)
12. Silindri ruumala [WWW] <https://www.valem.ee/et/silinder> (08.05.2021)
13. **Kask, Ü., Vares, V., Saareoks, M.** (2020). Puitkütuste kasutaja käsiraamat. Tartu: Tartu Regiooni Energiaagentuur. 154 lk.
14. Õhuniiskuse karakteristikud [WWW] <https://agromet3.weebly.com/kastepunkt.html> (21.05.2021)
15. **Paist, A., Poobus, A.** (2009). Soojusgeneraatorid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 147 lk.
16. Energia koolitusprogramm. Ülo Kask ettekanne. [WWW] [https://skk.ee/fileadmin/media/dokumendid/Koolituste\\_materjalid/energia\\_koolitusprogramm/UloKask\\_ettekanne\\_6.pdf](https://skk.ee/fileadmin/media/dokumendid/Koolituste_materjalid/energia_koolitusprogramm/UloKask_ettekanne_6.pdf) (26.05.2021)



17. **Treier, V., Kulu, E.** (1985). Soojustehnika laboratoorsed tööd. Tartu: Eesti Põllumajanduse Akadeemia. 20 lk.
18. **Kulu, P., Saarna, P., Tarbe, R., Kers, J., Veinthal, R.** (2010). Materjaliõpetuse praktikumide ja kodutööde juhendid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 136 lk.
19. **Treier, V.** (1989). Soojus- ja ainelevi alused. Tartu: EPA rotaprint. 88 lk.
20. **Mikk, I.** (1977). Soojustehnika käsiraamat. Tallinn: Valgus. 619 lk.
21. **Ots, A.** (2011). Soojustehnika aluskursus. Tallinn: Valgus. 816 lk.

## SUMMARY

In the work, the moisture content of the trees (black alder) standing in the outdoor environment was studied. Sample pieces of similar size were made to measure the humidity content. The parameters of the sample units were measured and recorded for calculation results, and then the test bodies were placed in a drying cabinet where the temperature was constantly  $105 \pm 2$  °C.

When analyzing the results of the test, the moisture content of the samples remained between 22.53...38.05 %. It is quite a large range of such a quantity of samples.

The main problem in the course of the work revealed was the measurement of samples. The measurement should have been carried out, for example, in the flood method. It would have been possible to determine the density of the samples.

As a result of the thesis, the study programme of the Estonian University of Life Sciences Engineering was completed. The laboratory work of the study subject of thermal engineering, during which students will be able to get acquainted with the measurements of fuel, in this case wood, moisture content.

The study material completed with this thesis gives the student an overview of the concepts and research methods of professional science. The student can also experience how to collect, analyze and interpret the data necessary for himself.

In the context of further studies, it would also be advisable to deal with computation of density and heating value.

**LISAD**

## Lisa 1. Laboratoorse töö juhend

### Küttepuidu omaduste mõõtmine

#### Laboratoorne töö (ε)

#### Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on tutvuda materjalide kuivatusprotsessidega. Mõista, kuidas niiskus mõjutab teisi puidu omadusi nagu tihedus, kütteväärtus, mahumass ja ruumala. Antud laboratoorses töös käsitletakse puidu niiskuse mõõtmist ja analüüsi.

#### Teooria

Vesi, veeaur ja jääkristallid võivad esineda ka täiesti tahketes materjalides, samuti vedelikes ja gaasides.

Puidu kuivatustehnilised omadused (niiskus kuivaine massi suhtes,  $W_k$ ):

- üle 33 % - toores,
- 21...33 % - poolkuiv,
- kuni 21 % - õhukuiv.

Kütuse niiskus on muutuv suurus. Kütuse kuivatamiseks püsiva massini kasutatakse kuivatuskappi, mille temperatuur peaks olema materjali süttimise vältimiseks  $105 \pm 2$  °C.

#### Valemid

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

kus  $w$  on niiskus %;

$m_1$  - mass enne kuivatamist kg;

$m_2$  - mass pärast kuivatamist kg.

## Töövahendid

Elektrooniline niiskusemõõdja, kaal(ud), kuivatuskapp, kalkulaator.

## Töö käik

1. Valida ette antud puuhalgude seast endale sobivaim. Lõigata sellest proovitükk. Proovitüki maksimaalne mass võiks olla 200 g. Märkige proovitükile tähis (õpinguraamatu number).
2. Määrake proovitüki mass enne kuivatuskappi asetamist võimalikult täpselt. Valige selleks sobivaim kaal. Kontrollige niiskuse ka elektroonilise niiskusemõõdja.
3. Asetage proovitükk vähemalt üheks ööpäevaks kuivatuskappi. Märkige üles kappi asetamise ja välja võtmise daatumid (kuupäev ja kellaaeg).
4. Määrake mass ja mõõtke proovitüki parameetrid pärast kuivatuskapist välja võtmist.
5. Koostage andmete analüüs EMÜ lõputööde vormistamise nõuete järgi.

## Andmete analüüs

1. Leidke proovitüki niiskus.
2. Leidke proovitüki kuivmass.
3. Esitage lühidalt laboratoorse töö järeldus.
4. Leidke vastused järgmistele küsimustele:
  - a. Milline oleks proovitüki mass 7% lõppniiskuse korral?
  - b. Milliseid kuivatamise viise tuntakse?
  - c. Millest võib tuleneda puidu mahumasside erinevus?

## **Lisa 2. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Maarja Salu,

Sünniaeg 20.05.1992,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö „Õppeaine “Soojustehnika” laboratoorne töö küttepuidu omaduste määramisest“,

mille juhendajad on Mart Hovi ja Külli Hovi.

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

Maarja Salu  
(allkirjastatud digitaalselt)

Tartu, 27.05.2021

(kuupäev)

---

### **Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

Mart Hovi

(juhendaja nimi ja allkirjastatud digitaalselt)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)

Külli Hovi

(juhendaja nimi ja allkirjastatud digitaalselt)

\_\_\_\_\_  
(kuupäev)